

**DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL
RECUBRIMIENTO ARC 855 POR TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS DE
CORRIENTE DIRECTA**

LUISA FERNANDA VALENCIA ALZATE

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO**

DIRECTOR:

PhD. JOSÉ LUIS TRISTANCHO REYES

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2020**

Pereira, abril de 2020

Nota de aceptación:

Firma del Director de Proyecto

A la primera persona, que se lo quiero agradecer es a mi tutor José Luis Tristancho Reyes, que sin su ayuda y conocimientos no hubiese sido posible realizar este proyecto.

A mis padres, por haberme proporcionado, la mejor educación y lecciones de vida. En especial a mi padre, por haberme enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue.

En especial a mi madre, por cada día por hacerme ver la vida de una forma diferente y confiar en mis decisiones.

A mis compañeros de clase, con los que he compartido grandes momentos.

A mis amigos, por estar siempre a mi lado.

A todos mis familiares por su apoyo.

A todos aquellos que siguen estando cerca de mí y que le regalan a mi vida algo de ellos.

LUISA FERNANDA VALENCIA ALZATE

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	9
OBJETIVOS	10
1. CAPITULO I MARCO TEORICO	
1.1. ACERO COLD ROLLED.	12
1.2. RECUBRIMIENTOS METÁLICOS	12
1.3. TÉCNICA DE PREPARACIÓN, APLICACIÓN Y PRUEBA PULL OFF.	14
1.4. CORROSIÓN.	15
1.4.1. FACTORES QUE INFLUYEN EL PROCESO DE CORROSIÓN.	15
1.4.2. TIPOS DE CORROSION.	16
1.5. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS	17
1.5.1. RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN LINEAL	18
1.5.2. CURVAS DE POLARIZACIÓN O EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL.	19
2. CAPITULO II METODOLOGIA Y EXPERIMENTOS	
2.1. PROBETAS, DISEÑO, Y CONTRUCCIÓN DE LA CELDA ELECTROQUIMICA Y MEDIO ELECTROLITO	20
2.1.1. PROBETAS.	20

2.1.2. PRUEBA PULL OFF.	22
2.1.3. CELDAS ELECTROQUIMICAS.	24
2.1.4. ELECTRODOS Y ELECTROLITOS.	27
2.1.5. POSICIONAMIENTO DE CELDAS	29
2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES ELECTROQUIMICAS	30
2.3. NOMENCLATURA DE ENSAYOS	31
3. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	
3.1. RESULTADOS OBTENIDOS.	32
3.1.1. EXTRAPOLACIÓN TAFEL O CURVAS DE POLARIZACIÓN.	33
3.1.2. RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL	34
3.2. ANÁLISIS DE DATOS	37
4. CONCLUSIONES	41
5. BIBLIOGRAFIA	42

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de granallado.	14
Figura 2. Función lineal resultante de la reducción de la ecuación BUTLER-VOLMER.	19
Figura 3. Curva característica TAFEL.	20
Figura 4. Área de contacto de la probeta con el electrolito.	21
Figura 5. Aparato de ensayo Pull Off.	23
Figura 6. Peón de ensayo.	23
Figura 7. Probeta de prueba Pull Off.	24
Figura 8. Plano de construcción celda electroquímica vista (1).	25
Figura 9. Celdas electroquímicas fabricadas.	26
Figura 10. Plano de construcción celda electroquímica vista (2).	26
Figura 11. Plano de construcción celda electroquímica.	27
Figura 12. Electrodo saturado de calomel.	27
Figura 13. Contra electrodo mina de grafito.	28
Figura 14. Recipiente 1000ml para salmuera.	29
Figura 15. Pesaje de sal marina.	29
Figura 16. Posicionamiento de celda para salmuera	29
Figura 17. Equipo Potenciostato-Galvanostato PG-TEKCORR 4.2 USB	30
Figura 18. Resultados de curvas tafel para el recubrimiento ARC 855 en salmuera a las 24 horas	33
Figura 19. Resultados curvas de la resistencia a la polarización lineal 24 horas en salmuera	35
Figura 20. Probeta sumergida en salmuera a las 00 horas	39
Figura 21. Probeta sumergida en salmuera a las 24 horas	39
Figura 22. Probeta sumergida en salmuera a las 48 horas	39
Figura 23. Probeta sumergida en salmuera a las 72 horas	39
Figura 24. Probeta sumergida en salmuera a las 96 horas	39
Figura 25. Probeta sumergida en salmuera a las 72 horas falló	39
Figura 26. Probeta usada para prueba Pull Off (1)	40

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades químicas del acero COLD ROLLED.	12
Tabla 2. Propiedades del recubrimiento ARC 855	14
Tabla 3. Composición química del recubrimiento ARC 855	22
Tabla 4. Porcentaje de adhesión de pruebas Pull Off	22
Tabla 5. Parámetros requeridos por el software.	31
Tabla 6. Nomenclatura de ensayos.	32
Tabla 7. Resultados Curvas de polarización o extrapolación de Tafel en salmuera con recubrimiento ARC 855	33
Tabla 8. Resultados resistencia a la polarización lineal al recubrimiento ARC 855.	36

INDICE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curvas de extrapolación de Tafel para el recubrimiento ARC 855 para salmuera.	34
Gráfica 2. Curvas de resistencia a la polarización lineal para el recubrimiento ARC 855 para salmuera.	36
Gráfica 3. Velocidad y resistencia a la corrosión vs tiempo de exposición.	38

1. INTRODUCCIÓN

A través de los tiempos el sector industrial ha requerido el uso de diversos tipos de recubrimientos (cerámicos, cermets (cerámicos/metálicos), polímeros, etc.) para de alguna manera evitar el contacto directo de los materiales metálicos con ambientes corrosivos, generando barreras protectoras que impidan el ingreso de elementos extraños y su reacción con la superficie de estos o simplemente para dar un acabado estético a la pieza.

Pueden ser usados como base para protección a la corrosión en industrias como carrocerías, vehículos, instalaciones industriales, puentes, maquinaria y tanques. Se usa también como base en sistemas con acabados poliuretanos y esmaltes sintéticos; y no se recomienda para inmersiones.

El proceso de recubrimiento es la aplicación de un espesor finito de algún material sobre una pieza o superficie. Los objetos deben cubrirse de tal manera que la superficie base quede completamente aislada del medio agresivo para reducir los daños producidos por este medio. De ello se deduce principalmente que las piezas a recubrir deben estar acabadas de tal forma que no requiera ningún mecanizado posterior, ya que este deterioraría el recubrimiento. El recubrimiento es la principal defensa que tienen nuestras piezas contra el medio en el que se encuentra para reducir el desgaste por medio de la corrosión por lo tanto debe de tener unas características mínimas para garantizar que este sea viable y factible para la labor que este requiere, tanto para aumentar la resistencia a la corrosión como al desgaste.

Para realizar la determinación de la resistencia a la corrosión del recubrimiento ARC 855, se deberá realizar una investigación previa, en donde se adquirirá un

conocimiento base de las aplicaciones del recubrimiento, después se pasara a realizar un análisis de ingeniería mediante el cual se recolectaran las características y formas de aplicación del recubrimiento, buscando determinar el método adecuado de aplicación. Posteriormente se pasará a tomar los datos necesarios de las diferentes pruebas que se harán para tomar las decisiones respectivas sobre la información entregada por estas pruebas.

No obstante, una vez aplicados estos recubrimientos, deben ser sometidos a pruebas para determinar su resistencia a la corrosión y predecir su tiempo de vida útil. En esta investigación se determinará la velocidad de corrosión del recubrimiento ARC 855 por medio de las técnicas electroquímicas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y Curvas de Polarización (CP) se ha demostrado que son métodos eficientes de monitoreo de velocidad de corrosión en tiempo real.

Para la descripción de la investigación en el siguiente documento, se determinan los siguientes capítulos:

CAPITULO I: En este capítulo se hablará sobre las definiciones y los conceptos necesarios para la comprensión y desarrollo de este proyecto.

CAPITULO II: Este capítulo tratara sobre la metodología, desarrollo o procedimiento de análisis que se realizó para ejecutar el proyecto.

CAPITULO III: Se mostrarán los resultados obtenidos por medio de las curvas de polarización y tafel, se analizarán las gráficas y se dictarán los resultados.

CAPITULO IV: Se presentarán las conclusiones y las recomendaciones que surgieron de este proyecto.

OBJETIVOS

1. OBJETIVO GENERAL.

Determinar el valor de la resistencia a la corrosión y la velocidad de corrosión, por medio de técnicas electroquímicas de corriente directa del recubrimiento ARC 855.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Evaluar la resistencia a la corrosión del recubrimiento ARC 855 por resistencia a la polarización lineal (RPL), al ser expuesto a ataque corrosivo en salmuera a 3.5% en peso. Durante 0, 24, 48, 72 y 96 horas.
- Determinar la velocidad de corrosión del recubrimiento ARC 855 por medio de curvas de polarización o curvas de Tafel al ser expuesto a un ataque corrosivo en salmuera a 3.5% en peso. Durante 0, 24, 48, 72 y 96 horas.
- Evaluar la adherencia del recubrimiento ARC 855 por medio de la técnica de Pull Off.

1. MARCO TEORICO

1.1.ACERO COLD ROLLED

El acero COLD ROLLED es elaborado bajo la norma ASTM A424, es fabricada de acero en caliente, luego su proceso ocurre a temperaturas bajas para reducir su espesor al mismo tiempo que cambia sus propiedades.

El acero COLD ROLLED es el material base que se utilizara en este proyecto, ya que es de fácil adquisición y es un material económico con el cual hacer pruebas es viable.

Tabla 1. *Propiedades químicas del acero COLD ROLLED*

Propiedades Químicas							Aplicaciones
Calidad	Norma		C	Mn	P	S	
			Contenido % en volúmen máximo				
Comercial	ASTM	A366	0.12	0.50	0.040	0.050	Calidad comercial para usos generales, proceso de corte, dobleces y soldaduras
	JIS	G3141 SPCC	0.12	0.50	0.040	0.045	Calidad comercial
	SAE	J403 1006	0.08	0.25-0.40	3	0.050	Comercial

1.2.RECUBRIMIENTOS METALICOS

Un recubrimiento de superficie es un concepto que se ha manejado a lo largo de la historia, se ha utilizado con fines decorativos, protectores y poco a poco se ha ido ampliado más su uso.

El uso de recubrimientos metálicos en ambientes agresivos se ha convertido en un método muy utilizado para proteger materiales de ingeniería, estos recubrimientos metálicos crean una barrera o una capa entre el material base y el medio ambiente, para garantizar que el recubrimiento ofrezca una mayor protección se debe elegir

bien que material metálico se utilizara, este material debe tener buena resistencia contra la corrosión ya que se sabe que los recubrimientos metálicos son buenos protegiendo contra condiciones ambientales agresivas tales como las altas temperaturas y la abrasión.

Cuando se aplica un recubrimiento hay que tener especial cuidado en la aplicación ya que un error en el proceso podría ocasionar fallas como burbujas debido al contaminante atrapado en la burbuja creada las cuales no garantizan el cuidado deseado en el material limitando su protección.

Los recubrimientos metálicos se han utilizado para darle protección a los materiales empleados en las distintas industria, ya que los recubrimientos alargan la vida útil de los metales o materiales base y al ser un método económico y efectivo para proteger ante la corrosión, el paso del tiempo o las altas temperaturas a las que pueden estar sometido los materiales en sus diversos usos, por lo tanto la idea es que el material que sea elegido como material de recubrimiento tenga buenas propiedades protectoras contra la corrosión y que ayude a aumentar las propiedades del sustrato en este caso el *Cold Rolled*.

El material que se utilizó como elemento de recubrimiento fue el ARC 855 pintura anticorrosiva el cual tiene muy buenas propiedades, es de fácil adquisición y económico, se escogió este materiales porque sus propiedades fisicoquímicas son muy convenientes para proteger al material de estudio Cold Rolled de ambientes agresivos o de la corrosión. Se aplicaron por medio de la técnica

Tabla 2. *Propiedades del recubrimiento ARC 855.*

Sección 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS			
Gravedad Específica:	0.92 Kg/L	Presión de Vapor: mmHg a 20 °C	97
Punto de Ebullición:	77 °C	% Volátiles:	85
Punto de Congelación:	N.A	Rata de Evaporación:	ND
Apariencia y Olor:	Líquido coloreado con olor a disolvente	Densidad del Vapor:	0.88
PH:	ND	Solubilidad:	Insoluble en agua

1.3. TECNICA DE PREPARACIÓN, APLICACIÓN Y PRUEBA PULL OFF

Las superficies de acero se limpiarán para quitar el aceite, grasa, etc. Y las capas gruesas de óxido se sacarán con un cincel antes del tratamiento. El granallado grado Sa 2 Arenado-Granallado minucioso quita casi toda la capa de laminación y de óxido y casi todas las partículas extrañas. Deberá adquirir entonces un color grisáceo, luego de esto se proporcionara una superficie de anclaje suficiente para una adherencia del material y se correrá la prueba pull off para evaluar con éxito la adherencia de los materiales de reparación y la resistencia en la superficie de los elementos.

Figura 1. Esquema del proceso de granallado



1.4. CORROSIÓN

La corrosión es un concepto que hace referencia al proceso de deterioro de un material metálico ya sea el metales puro o en alguna aleaciones, lo hace por medio de reacciones químicas producto de la exposición del metal con el oxígeno, los metales son obtenidos de la naturaleza por medio de minerales que se encuentran en su estado natural, desde ahí se da el fenómeno de la corrosión ya que con el paso del tiempo los metales tienden a volver a su estado natural haciendo que se desgaste el material.

Gran parte de los procesos de corrosión se puede observar reacciones de reducción-oxidación es decir reacciones electroquímicas, donde se es necesario la existencia de electrodos (un cátodo y un ánodo) donde el ánodo será el material que se sacrifica y protegiendo al cátodo, un electrolito que es el medio conductor que comúnmente es un medio acuoso y debe existir una conexión eléctrica entre los electrodos para que haya una transferencia de electrones de un material a otro.

1.4.1. FACTORES QUE INFLUYEN EL PROCESO DE CORROSIÓN

En el medio ambiente hay muchos factores que influyen en el proceso de corrosión donde se debe tener en cuenta las características del material y el medio en que se encuentra.

- Acidez de la solución: en una solución acuosa se debe tener en cuenta el pH, en este caso la acidez es menor a 7 haciendo la solución ácida, esto quiere decir que hay una concentración de iones hidrógeno libres en la solución, lo cual la hace capaz de recibir electrones para poder estabilizarse, debido a esto la solución ácida es más corrosiva que una solución neutra donde el pH es igual a 7, ya que permite que la zona anódica reaccione en mayor proporción.

- Capas protectoras: la existencia de capas protectoras o de recubrimientos sobre la superficie del sustrato hace que la corrosión aparezca formando capas de óxidos metálicos que hacen ms lento el proceso de corrosión.
- Temperatura: la temperatura influye mucho en el proceso corrosivo ya que al aumentar la temperatura aumenta la velocidad de corrosión también, esto se debe a que se acelera la difusión del oxígeno del medio hacia el metal afectado.
- Concentración de oxígeno: el aumento de oxígeno en el medio electrolítico puede hacer que el proceso de corrosión se acelere o se haga más lento dependiendo del material, para los metales o materiales ferrosos al aumentar el oxígeno se aumenta la velocidad de corrosión.

1.4.2. TIPOS DE CORROSION

- Corrosión química: este tipo de corrosión se da cuando el metal reacciona con un medio no iónico.
- Corrosión electroquímica: es el proceso por el cual se presenta un transporte simultáneo de electricidad por medio de electrones.
- Corrosión generalizada o uniforme: consiste en que la superficie del metal se corroe al mismo tiempo, es decir, la velocidad de corrosión es la misma en toda su superficie, este proceso de corrosión es homogéneo en todo el material haciendo que se deteriore completamente, esto permite poder identificarlo rápido y poder predecir qué tiempo de vida útil tiene el metal.
- Corrosión localizada: al contrario de la corrosión generalizada, la corrosión localizada sucede cuando en un punto específico de la superficie del sustrato la velocidad de corrosión se concentra y aumenta, la corrosión va dañando

el punto donde se encuentra y empieza a expandirse, en este tipo de corrosión hay que tener especial cuidado ya que es poco notorio o visible la corrosión provocando accidentes o fallas en el metal y pérdidas de dinero en la industria.

- Corrosión galvánica: la corrosión galvánica es generada cuando dos metales de diferente potencial son conectados en presencia de un electrolito formando una celda electroquímica, donde el electrodo que tiene comportamiento anódico va cediendo electrones al electrodo cátodo y empieza a corroerse.

1.5. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

La electroquímica estudia las técnicas que permiten establecer el ordenamiento y comportamiento de las interacciones en los iones presentes en un electrolito y los metales que lo rodean, para que este proceso se dé es necesario que exista una oxidación y una reducción, es decir un material que se comporte como ánodo y se sacrifique y otro material que sea el cátodo, es decir el material que se protege, es necesario que la superficie metálica entre en contacto con un medio acuoso para que dé inicio a una serie de procesos termodinámicos y cinéticos, es decir un ordenamiento de cargas eléctricas, los electrones libres del metal modifican el espacio eléctrico y genera una interacción con iones y masa.

En la oxidación cada átomo cede n electrones para mantener la electro neutralidad del sistema y la reducción tomara estos electrones para protegerse, ambas reacciones anódica y catódica ocurren de manera simultánea y el balance de electrones de los reactivos y productos es equivalente con el avance tecnológico en la electrónica donde es posible medir corrientes, la obtención de equipos y software ha permitido estimular los pulsos de campos eléctricos estacionarios y variables con

el tiempo sean más sencillo de manejar mejorando las técnicas electroquímicas y haciéndolas más precisas.

1.5.1. RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN LINEAL

Este método de la electroquímica es usado para determinar la velocidad de corrosión y para determinar el grado de deterioro de un material, esta técnica se puede definir la resistencia de un material a ser oxidado durante la aplicación de un potencial externo, usualmente se expresa en MPY (mili pulgadas por año).

La resistencia a la polarización lineal se expresa calculando la pendiente de la región lineal de la curva.

$$I_{corr} = \frac{B}{RP} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

I_{corr} : Densidad de corriente

B : constante que sirve para representar la relación entre pendientes tafel

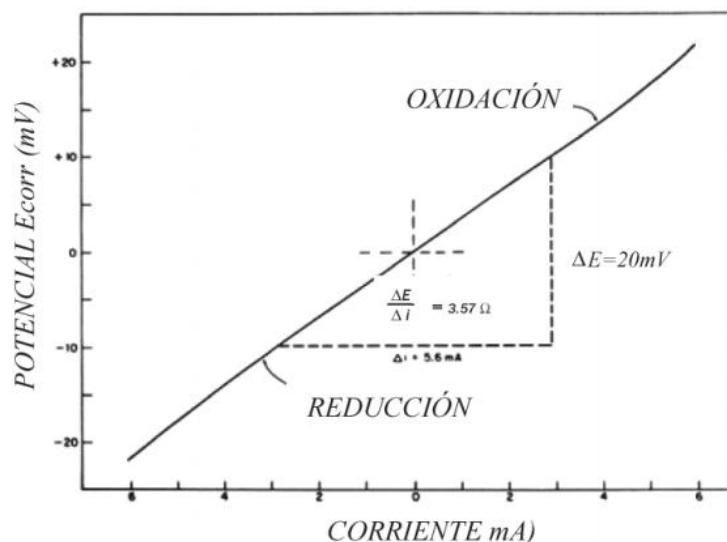
RP : resistencia a la polarización lineal

La relación entre las pendientes tafel se puede expresar de la siguiente manera:

$$B = \frac{b_a * b_c}{2.303 (b_a + b_c)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Esta ecuación establece la relación entre la densidad de la corriente de corrosión (I_{corr}) y la velocidad de corrosión, con la resistencia a la polarización.

Figura 2. Función lineal resultante de la reducción de la ecuación de Butler-Volmer



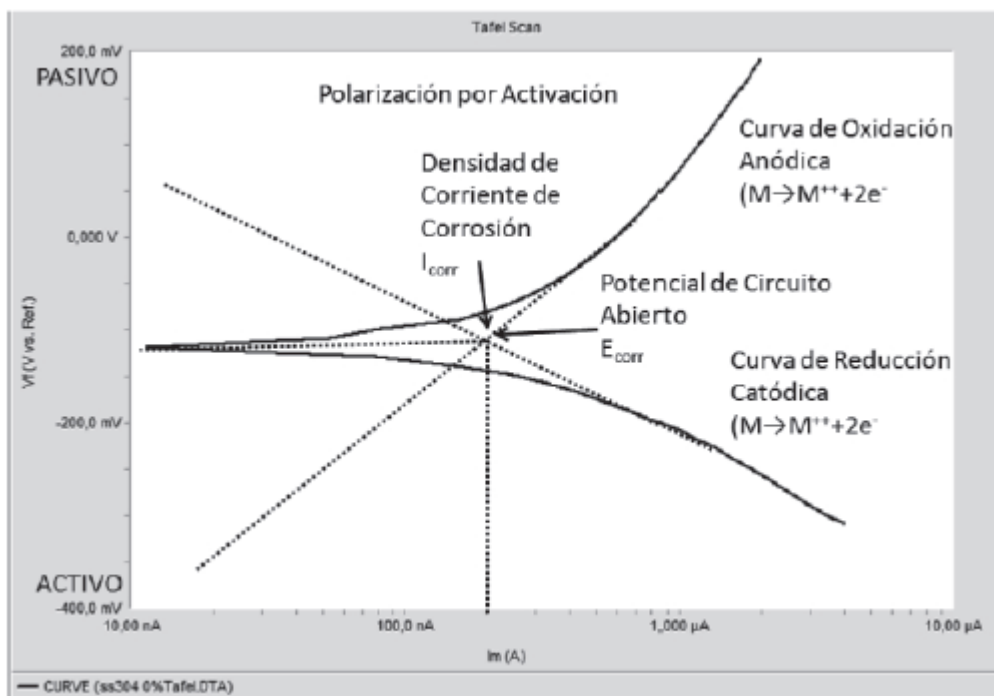
1.5.2. CURVAS DE POLARIZACIÓN O EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL

Para determinar los parámetros cinéticos i_o , β_a , β_c se recomienda una representación grafica en la que la densidad de corriente esté en una escala logarítmica por la relación lineal existente entre logaritmo de la densidad de corriente y el potencial.

El método de extrapolación Tafel se utiliza para calcular la velocidad de corrosión, este método se emplea de la siguiente manera:

- El material metálico se polariza a diferentes potenciales, en dirección catódica y dirección anódica.
- Se utiliza las leyes de Faraday para convertir la densidad de corriente de corrosión I_{corr} a velocidad de corrosión.
- Extrapolar las zonas lineales E_{corr} hasta la intersección de las dos rectas.

Figura 3. Curva característica de Tafel



Por medio de la gráfica (figura 3) las pendientes de las curvas se pueden determinar mediante el trazado de una línea tangente a cada una de las curvas de polarización, el punto donde se encuentran las rectas tangentes a las curvas, permite por extrapolación determinar el punto de corte en el eje de corriente, siendo este punto la corriente de intercambio i_o o la corriente de corrosión I_{corr}

2. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS

2.1. PROBETAS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA Y MEDIO ELECTROLÍTICO

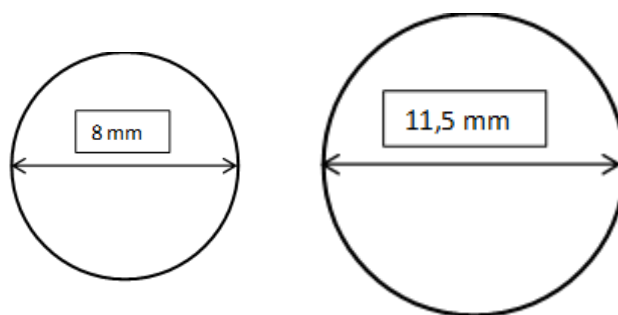
2.1.1. Probetas

Para el desarrollo de las prácticas y comprobaciones mediante curvas de polarización y resistencia a la polarización lineal, se utilizaron una serie de probetas en forma de láminas de acero cold rolled, fueron necesarias alrededor de 10 piezas

en total, entre algunas de descarte y otras realmente aprovechadas. Se compraron las láminas de acero cold rolled las cuales debieron ser recortadas para obtener muestras de aspecto similar. Se realizó un granallado en la empresa Bronces y Laminas del sector industrial de Dosquebradas con un grado Sa 2 Arenado-Granallado minucioso que removió casi toda la capa de laminación y de óxido y casi todas las partículas extrañas, proporcionando así una mejor superficie de anclaje y permitiendo una mejor adhesión, luego se les aplicó el recubrimiento ARC 855 que fueron aplicados por medio de la técnica de brocha.

El área de contacto depende de la celda electroquímica utilizada, ya que se contaba con dos tipos diferentes de celdas, los diámetros fueron los siguientes:

Figura 4. Área de contacto de la probeta con el electrolito.



Por ende, tenemos como área de contacto $50,2654 \text{ mm}^2$ y $103,8689 \text{ mm}^2$ respectivamente.

Es importante conocer las propiedades físicas y la composición química del recubrimiento utilizado en las probetas, siendo estos mostrados en las tablas a continuación:

Tabla 3. Composición química del recubrimiento ARC 855

Sección 2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN DE INGREDIENTES					
COMPONENTES	CAS #	ACGIH TLV	OSHA PEL	OTROS LIMITES	%
Base para lacas	-	-	-	-	20-25
Disolvente oxigenado	141-78-6	500 mg/m ³	-	-	20-25
Disolvente tipo Ester	110-19-0	480 mg/m ³	-	-	20-25
Propano- Butano	74-98-6	1000 ppm	-	-	25-30

2.1.2. Prueba Pull-off

Uno de los ensayos más comunes a la hora de caracterizar la adherencia de la pintura en un sustrato de acero es el ensayo de adherencia por tracción o también conocido como “pull-off test”.

Este ensayo sirve para evaluar la adherencia el recubrimiento aplicado sobre el sustrato de acero mediante la medida del esfuerzo en tracción necesario para desprender o romper el recubrimiento aplicado en dirección perpendicular al sustrato. La norma de referencia es la UNE-EN-ISO 4624:2003.

Para realizar este ensayo se pega un cilindro de 2 cm de diámetro sobre la superficie de las probetas con un adhesivo de alta resistencia llamado loctite. La parte superior del cilindro se conecta con la máquina de tracción a través de un conjunto de bisagras y un pin, mientras que la probeta se sujeta al bastidor inferior de la máquina de ensayo, a continuación se ensaya.

Finalmente, sobre la superficie de rotura, se cuantifica cualitativamente el porcentaje de la superficie de la probeta rota por la inter cara sustrato-recubrimiento (adhesiva) y porcentaje de rotura en el recubrimiento (cohesiva).

Tabla 4. Porcentaje de adhesión con prueba Pull Off

Número de probetas	Espesor de capa				Promedio	Horas
1	54	66	58	46	56	0 y 24
2	38	35	34	20	31,75	48
3	41	33	47	43	41	72
4	44	50	45	41	45	96
Área expuesta 25 cm ²						

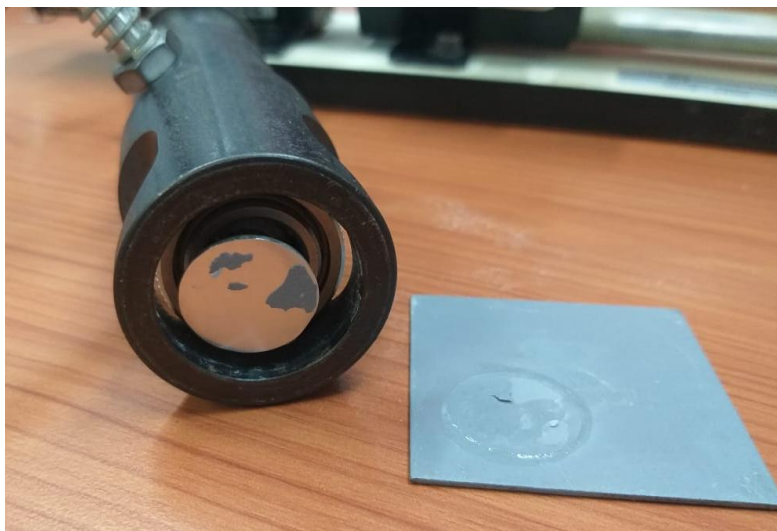
Figura 5. Aparato de ensayo Pull Off



Figura 6. Peón de ensayo



Figura 7. Probeta de la prueba Pull Off



2.1.3. Celdas electroquímicas

Las celdas utilizadas para el desarrollo de la investigación no fueron diseñadas en este proyecto, dado que, en prácticas anteriores se realizó el diseño y fabricación de estas. Con la autorización correspondiente por parte del *CECEND* y de las personas encargadas de la fabricación de las celdas existentes, se hace el correcto uso de ellas.

Para una mejor representación e interpretación de las celdas electroquímicas utilizadas, se muestran los planos de construcción, como también, algunos datos de su elaboración.

Se realizó un diseño en el programa de diseño *SOLIDWORKS*, donde los parámetros utilizados fueron sugeridos por el director de proyecto, basándose en prototipos presentes en el laboratorio *CECEND*, los cuales están fabricados en un material acrílico, esto con el fin de reducir costos y garantizar que el tipo de material no interfiera con el resultado de las pruebas.

Para la realización de este proyecto se utilizaron cuatro celdas electroquímicas para realizar las pruebas con mayor agilidad, las cuales fueron fabricadas con dos tipos de dimensiones diferentes que serán mostradas a continuación:

Figura 8. Plano de construcción celda electroquímica.

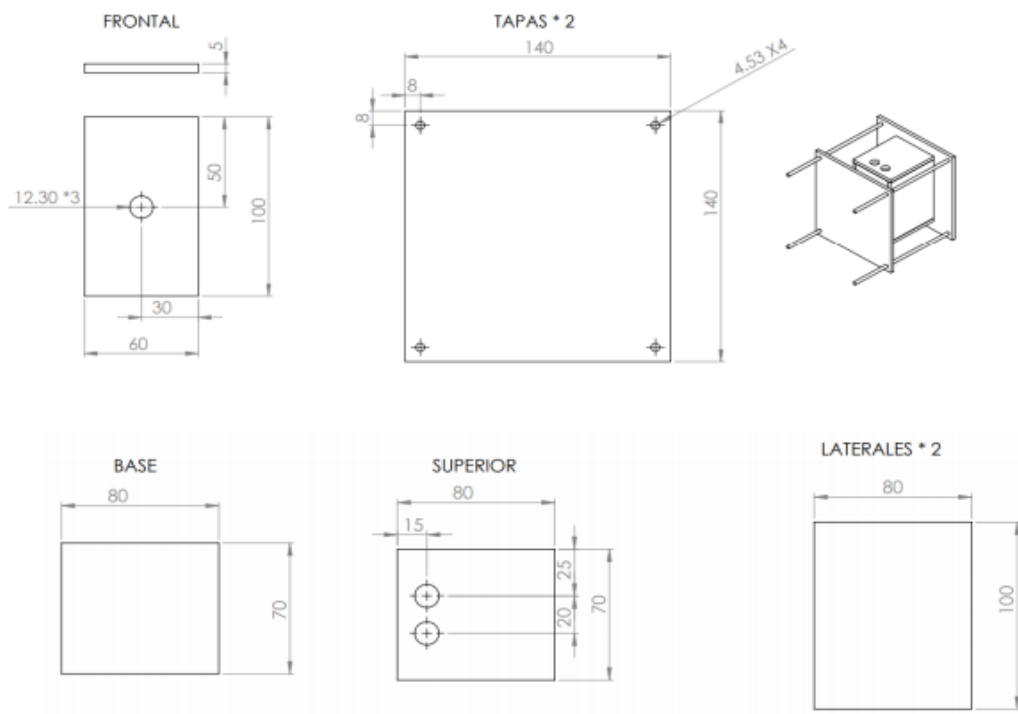


Figura 9. Celdas electroquímicas fabricadas.



Figura 10. Plano de construcción celda electroquímica.

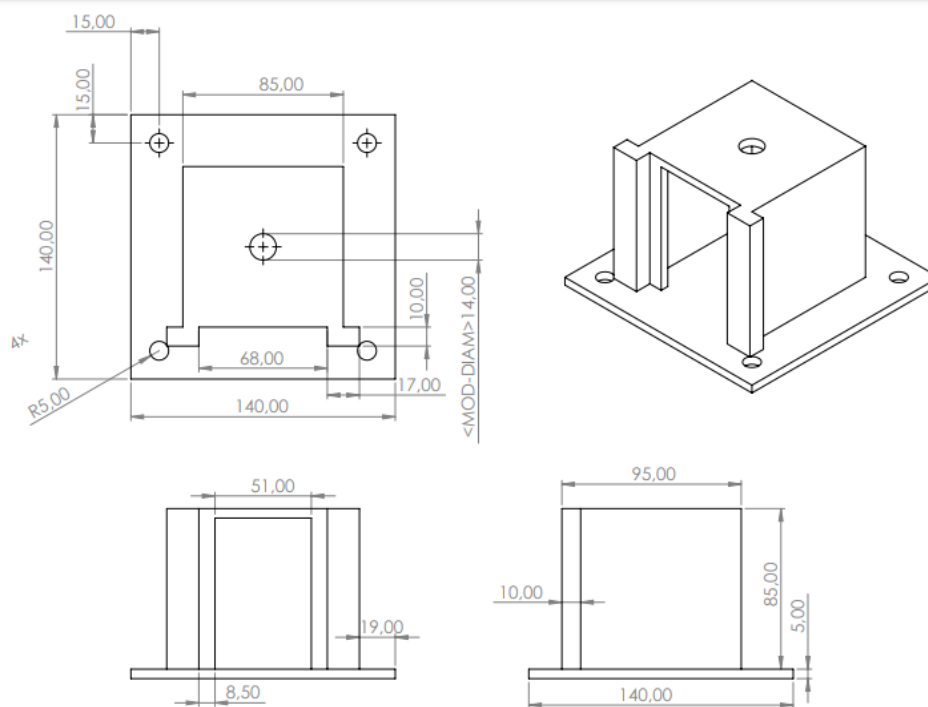
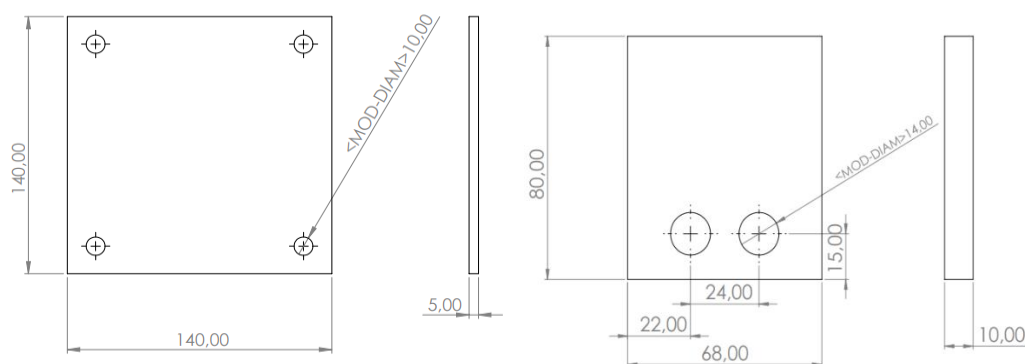


Figura 11. Plano de construcción celda electroquímica.



2.1.4. Electrodo y electrolitos

Durante la investigación, al momento de la realización de las pruebas de resistencia a la polarización lineal y de las curvas de interpolación o extrapolación de Tafel, se utilizaron tres electrodos, descritos de la siguiente manera:

- **Electrodo de referencia:** El electrodo de referencia utilizado fue un electrodo saturado de calomel (SCE, por sus siglas en inglés), el cual se basa en la reacción entre mercurio y cloruro de mercurio (I) conectado a la solución saturada de cloruro de potasio del tubo externo, a través de un pequeño orificio.

Figura 12. Electrodo saturado de calomel.



- **Electrodo de trabajo:** En este caso, se utilizan las probetas de acero cold rolled recubiertas de ARC855 como electrodo de trabajo, puesto que serán en estas en las cuales se hará el respectivo análisis del proceso de corrosión.
- **Contra electrodo:** Se utilizó como contra electrodo una mina de lápiz, cuyo material es el grafito.

Figura 13. Contra electrodo, mina de grafito.



Se utilizó como medio electrolítico salmuera para simular un agente corrosivo. La salmuera fue preparada al 3,5% W, es decir, se utilizó un recipiente de 1000 mL lleno de agua, con un peso estimado de 1000 g, por lo tanto, se debió verter en él 35 g de sal marina que luego se procedió a agitar para mezclar hasta que no se encontraran partículas de sal.

Figura 14. Recipiente de 1000 ml con Salmuera



Figura 15. Pesaje de la sal marina.

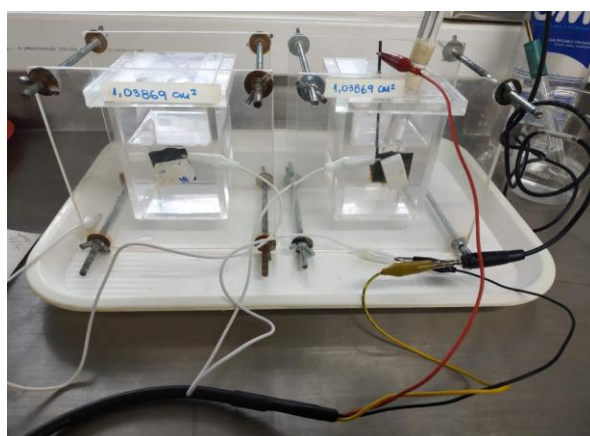


2.1.5. Posicionamiento de las celdas

Una vez las mezclas estén listas, se continúa con la ubicación de las probetas en las celdas electroquímicas; mucho del resultado final de la investigación depende de este procedimiento, puesto que se debe garantizar que el área expuesta a las soluciones se mantenga permanentemente en contacto con el fluido para que el fenómeno de la corrosión se dé de manera correcta. Para ubicar las probetas, se utilizan trozos de borrador para que genere una fuerza uniforme hacia la celda.

Una vez se tengan las probetas correctamente posicionadas, se cerciora de que no haya fugas para que el fluido se mantenga a la misma altura y cubra completamente la pieza, para garantizar esto, se llena la celda con agua filtrada y se deja reposando alrededor de 2 minutos para verificar que no exista fuga alguna.

Figura 16. Posicionamiento de la celda para la salmuera.



2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES ELECTROQUIMICAS

Para calcular y/o estimar la velocidad de corrosión del recubrimiento ARC 855 en un ambiente corrosivo, se utilizaron dos métodos electroquímicos diferentes: resistencia a la polarización lineal (RPL) y curvas de polarización o extrapolación de Tafel (TAFEL). Estas pruebas fueron realizadas durante dos semanas, en un intervalo de 24 horas entre cada una de ellas, contando con intentos fallidos e intentos correctos.

Se utilizó un computador acompañado del programa computacional “PG 01X18E1CE6” y junto a un potencióstato-galvanostato PG-TEKCORR 4.2 USB, los cuales fueron suministrados por el director del proyecto y dispuestos en el laboratorio CECEND; todo el proceso fue monitoreado por el director del proyecto, quien suministraba la información pertinente para la operación de los equipos.

Figura 17. Equipo potencióstato-galvanostato PG-TEKCORR 4.2 USB.



Los siguientes, son parámetros necesarios para que el software pueda ejecutar las técnicas electroquímicas requeridas:

Tabla 5. Parámetros requeridos por el software.

PROPIEDAD	SALMUERA
PESO EQUIVALENTE [g/eq]	0,5283
DENSIDAD [g/cm ³]	1,32086
ÁREA [cm ²]	0,7853
pH [Unidades]	7

Tanto la densidad, el área y el pH son datos obtenidos de la literatura, o estaban anteriormente consignadas en las tablas incluidas en el proyecto, mientras que el peso equivalente fue calculado con la siguiente ecuación:

$$P.E = \frac{1}{N_{eq}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\text{Donde: } N_{eq} = \sum \left(\frac{f_i \times n_i}{a_i} \right)$$

Donde:

F_i = Fracción de masa

n_i = Intercambio de electrones (Valencia)

a_i = Peso equivalente

2.3. NOMENCLATURA DE ENSAYOS

Para poder analizar con facilidad las diferentes probetas y no causar confusión entre ellas, se hace necesario utilizar una nomenclatura, es decir, asignarle un nombre a cada una de las mismas. Explicando implícitamente su nombre, el electrolito utilizado, la prueba realizada y el tiempo expuesto, a continuación, se muestra la explicación de la nomenclatura:

SALRPL48

SAL: Electrolito salmuera.

RPL: Resistencia a la polarización lineal.

48: 48 horas de exposición.

SALT72

SAL: Electrolito salmuera.

T: Curva polarización o extrapolación de TAFEL.

72: 72 horas de exposición.

Tabla 6. Nomenclatura de ensayos.

ENSAYO	TÉCNICA ELECTROQUIMICA		TIEMPO DE EXPOSICIÓN [H]					SALMUERA AL 3.5%
	RPL	TAFEL	0	24	48	72	96	
SALRPL00	X		X					X
SALT00		X	X					X
SALRPL24	X			X				X
SALT24		X		X				X
SALPRL48	X				X			X
SALT48		X			X			X
SALPRL72	X					X		X
SALT72		X				X		X
SALPRL96	X						X	X
SALT96		X					X	X

3. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE DATOS

3.1. RESULTADOS OBTENIDO

A continuación, se presentará los resultados que se obtuvieron en los ensayos electroquímicos los cuales fueron resistencia a la polarización lineal (RPL) y extrapolación TAFEL o curvas de polarización, con estos resultados y con ayuda de las gráficas se podrá observar claramente como es el comportamiento que tuvo el recubrimiento ARC 855 y cuál es la velocidad de corrosión ante los ambientes corrosivos: salmuera al 3.5%.

3.1.1. Extrapolación TAFEL o Curvas de Polarización

Los resultados que se obtuvieron por medio del ensayo de extrapolación TAFEL para el recubrimiento ARC 855 en cada ambiente corrosivo se mostrará en las tablas 7 y 8, las cuales contienen las constantes TAFEL, anódica (β_a), catódica (β_c) y beta (β), estos datos fueron esenciales para la realización del análisis de resistencia a la polarización lineal (RPL). En la siguiente figura se podrá observar un ejemplo de la gráfica mostrada por el software que se utilizó para la obtención de datos.

Figura 18. Resultados curva TAFEL para el recubrimiento ARC 855 en salmuera a las 24 horas.

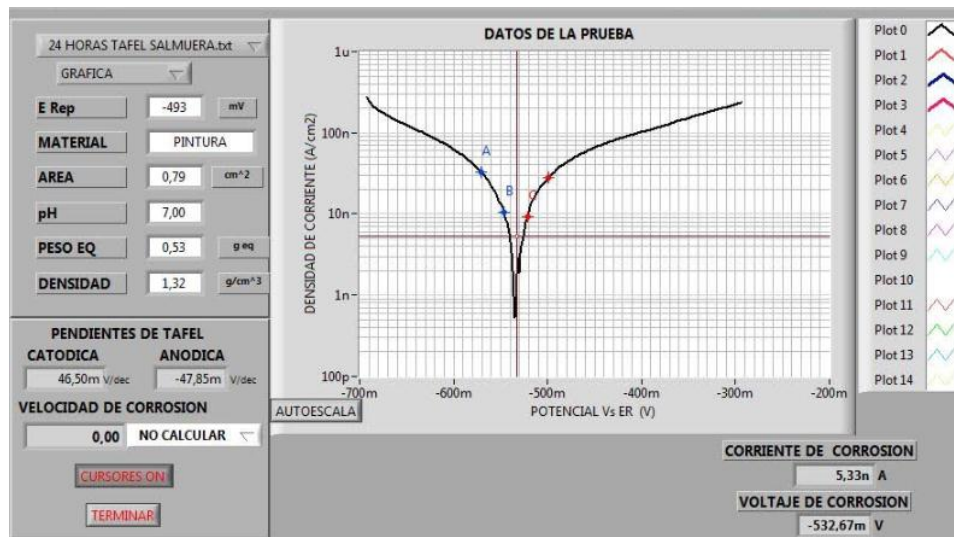
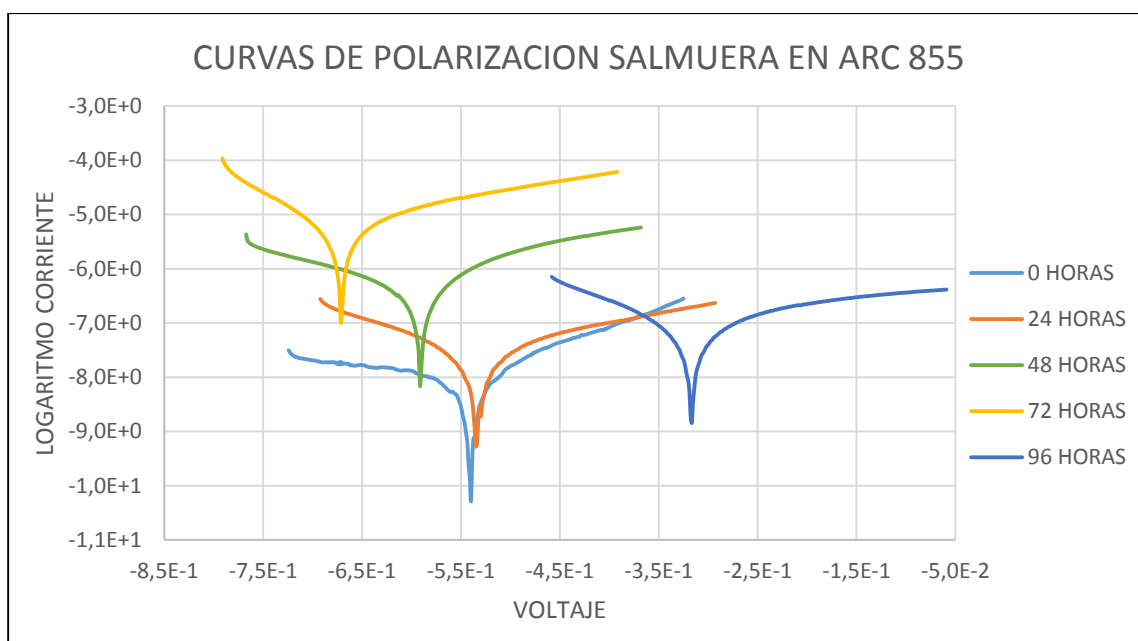


Tabla 7. Resultados Curvas de polarización o extrapolación de Tafel en salmuera con recubrimiento de ARC 855

SALMUERA			
NOMBRE DE ENSAYO	BETA ANOICA	BETA CATODICA	BETA
SALT00	27,4	27,43	5,95202
SALT24	47,85	46,5	10,23998
SALT48	36,91	26,11	6,64016
SALT72	80,83	120,17	20,98353
SALT96	44,68	48,75	10,12296

En las siguientes graficas que se enseñaran a continuación son el resultado de la compilación de la información y datos obtenidos del programa computacional PG 01X18E1CE6 para cada determinado tiempo de exposición del recubrimiento al ambiente corrosivo, luego estos datos se introdujeron a Excel con la finalidad de graficar todas las curvas juntas y facilitar la comparación de resultados obtenidos.



Gráfica 1. Curvas de extrapolación de Tafel para el recubrimiento de ARC 855 para salmuera.

3.1.2 Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

En esta técnica electroquímica se puede hallar densidad de corriente (I_{CORR}) y la velocidad de corrosión (V_{CORR}) necesarias para este proyecto.

Para determinar la cinética de corrosión se hizo uso de la ecuación de Stern and Geary que relaciona la densidad de corriente de corrosión (I_{CORR}) (mA/cm^2) con el valor de resistencia a la polarización (R_p) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) [18].

$$RP = \frac{\beta}{I_{CORR}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

En donde β corresponde a una constante adimensional que se determina a partir de los valores de las curvas de Tafel anódica (β_a) y catódica (β_c), haciendo uso de la ecuación 2:

$$\beta = \frac{\beta_a \cdot \beta_b}{2.303(\beta_a + \beta_b)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

La velocidad de corrosión (V_{CORR}) está en función de la densidad de corriente de corrosión (I_{CORR}) (mA/cm²), del peso equivalente (P.E (g)) y de la densidad del material (ρ (g/cm)), así:

$$V_{CORR} = 3.27 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{I_{CORR} \cdot P.E}{\rho} \right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

En las siguientes tablas se presentarán los resultados obtenidos al aplicar esta técnica electroquímica al recubrimiento ARC 855 para cada ambiente corrosivo a cada tiempo determinado de exposición.

En la siguiente figura se podrá observar un ejemplo de la gráfica mostrada por el software que se utilizó para la obtención de datos.

Figura 19. Resultado curvas de resistencia a la polarización lineal a las 24 horas en salmuera.

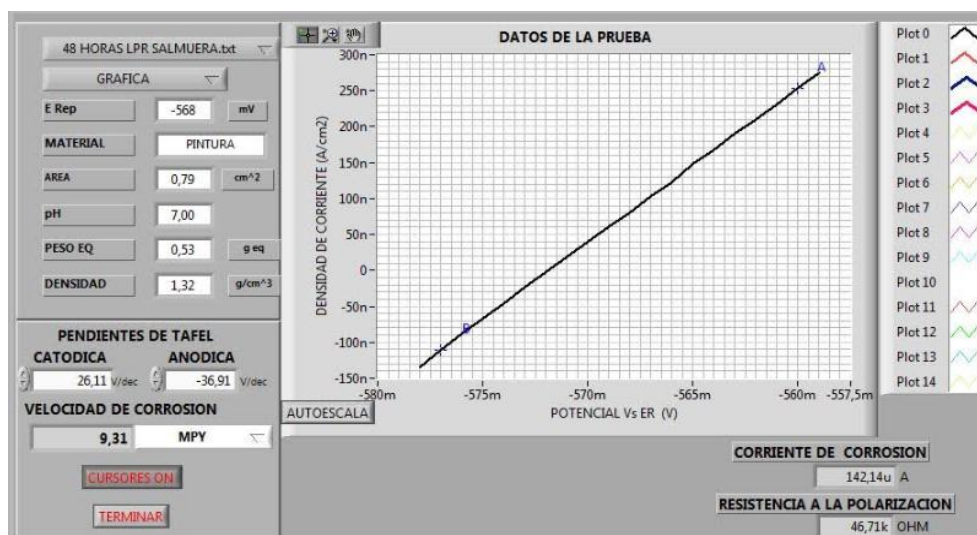
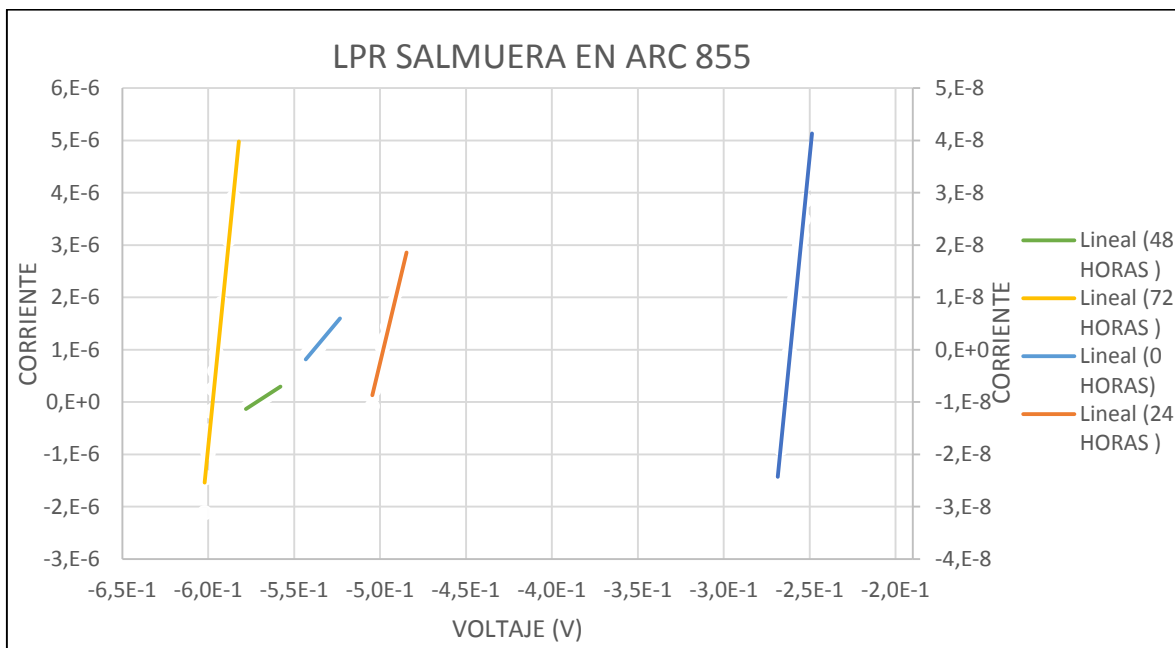


Tabla 8. Resultados resistencia a la polarización lineal al recubrimiento ARC 855 para salmuera.

SALMUERA			
NOMBRE DE ENSAYO	$I_{corr} (\mu A)$	RP ($M\Omega$)	$V_{corr} (MPY)$
SALRPL00	2,91	2,05	0,19048
SALRPL24	13,61	0,752	0,8908
SALRPL48	142,14	0,046	9,31
SALRPL72	7,49	0,00278	0,49043
SALRPL96	34,4	0,2942	2,25

En las siguientes graficas que se enseñaran a continuación, son el resultado de la compilación de la información y datos obtenidos del programa computacional PG 01X18E1CE6 para cada determinado tiempo de exposición del recubrimiento al ambiente corrosivo, luego estos datos se introdujeron a Excel con la finalidad de graficar todas las curvas juntas y facilitar la comparación de resultados obtenidos.



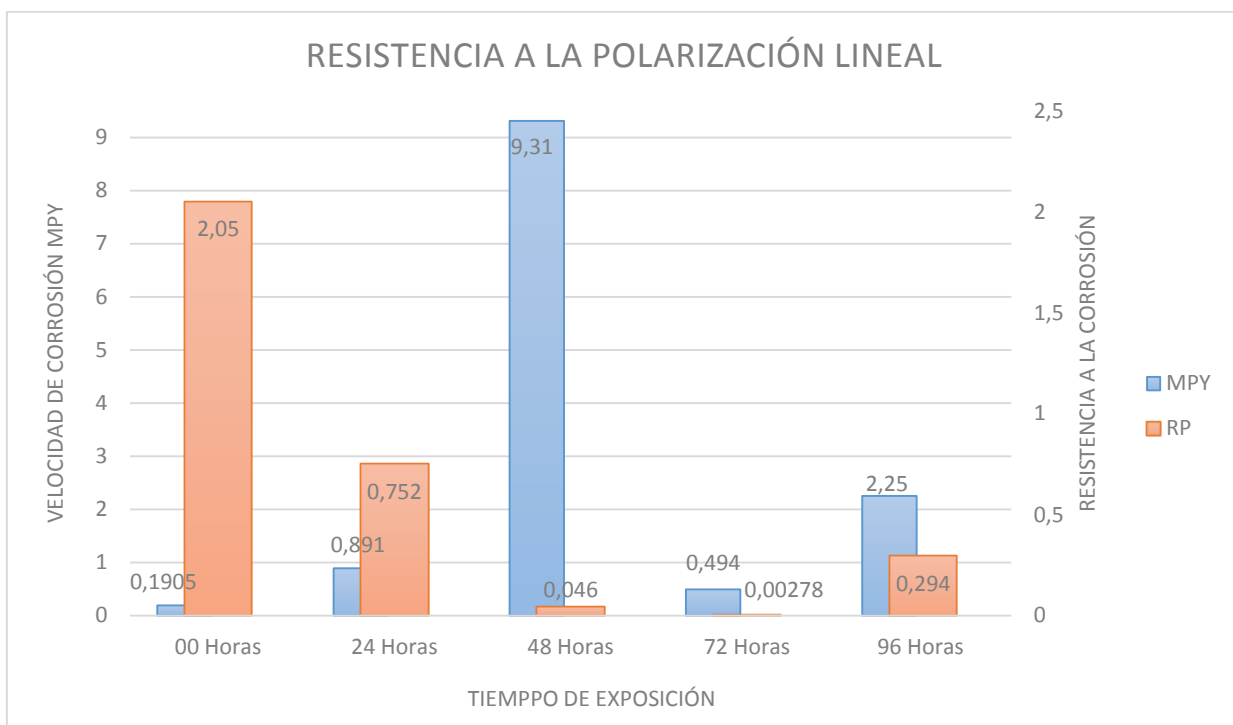
Gráfica 2. Curvas de resistencia a la polarización lineal para el recubrimiento de ARC 855 para corrosión salmuera.

3.2 ANÁLISIS DE DATOS

Reuniendo los datos, gráficas y tablas mostradas anteriormente se puede establecer cuál fue el tiempo de exposición donde se encuentra la mayor velocidad de corrosión y donde se encuentra la mayor resistencia a la polarización lineal en los diferentes tiempos de exposición a la corrosión, determinar en qué tiempo de exposición se da estos fenómenos y donde los recubrimientos pueden ofrecer más protección.

De la tabla 8 se observa que en el ensayo SALRPL72 donde las probetas con el recubrimiento ARC 855, expuestas al agente corrosivo salmuera presento el mayor valor de resistencia a la polarización en el tiempo de 00 horas de 2,05 Ω y una i_{corr} de 2,91 (mA), por consiguiente, para el valor máximo de velocidad de corrosión se obtiene a las 48 horas de exposición con un valor de 9,31 MPY, donde el valor a la resistencia a la polarización es 0,046 Ω .

Las curvas de extrapolación de tafel y las curvas de resistencia a la polarización, junto con los resultados de pendiente anódica (β_a), pendiente catódica (β_c), resistencia a la polarización (RP), corriente de corrosión (i_{corr}) y velocidad de corrosión (V_{corr}), son proporcionados por el software del potencióstato (gráficas 1 y 2), y se han corroborado mediante cálculos en Excel y las ecuaciones (1), (2), (4) y (5).



Gráfica 3. Velocidad y resistencia a la corrosión vs tiempo en salmuera

De la gráfica 3 se puede evidenciar las velocidades de corrosión con respecto al tiempo, del recubrimiento ARC 855, la velocidad de corrosión es mayor para el ARC 855 a las 48 horas.

Para determinar la velocidad de corrosión, mostrados en la tabla 8, se hizo uso del software del potenciostato y de la ecuación de Stern and Geary, que relaciona la densidad de corriente de corrosión (I_{cor}) en mA/cm^2 con el valor de resistencia a la polarización (R_p) en $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

$$RP = \frac{\beta}{I_{CORR}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

En donde β corresponde a una constante adimensional que se determina a partir de los valores de las pendientes de Tafel anódica (β_a) y catódica (β_c), de la siguiente forma:

$$\beta = \frac{\beta_a * \beta_b}{2.303(\beta_a + \beta_b)} \quad \text{Ecuación (2)}$$







La velocidad de corrosión está dada entonces en función de la densidad de corriente de corrosión, I_{corr} (mA/cm²), del peso específico, P.E (g) y de la densidad de cada recubrimiento, ρ (g/cm³) mediante la siguiente relación:



$$V_{CORR} = 3.27 * 10^{-3} * \left(\frac{I_{CORR} * P.E}{\rho} \right) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

K = 0.00327; para Vcorr dado en mm/y

K= 0.1288; para Vcorr dado en mpy

	
FIGURA 20. Probeta sumergida en salmuera a las 0 horas.	FIGURA 21. Probeta sumergida en salmuera a las 24 horas.
	
FIGURA 22. Probeta sumergida en salmuera a las 48 horas.	FIGURA 23. Probeta sumergida en salmuera a las 72 horas.
	
FIGURA 24. Probeta sumergida en salmuera a las 96 horas.	FIGURA 25. Probeta sumergida en salmuera 72 horas y fallo.

	
<p>FIGURA 26. Probeta usada para prueba Pull Of (1)</p>	<p>FIGURA 27. Probeta usada para prueba Pull Off (2)</p>

De las figuras 20, 21, 22, 23, 24 y 25 se ver como quedaron las probetas después de estar sumergidas 96 horas en salmuera, se evidencia en el estado de corrosión avanzada en que se encuentran con lo cual se puede corroborar los resultados de velocidad de corrosión expuesta en cada agente corrosivo.

El uso de las técnicas: resistencia a la polarización lineal y curvas de polarización TAFEL, son una herramienta importante en la evaluación del proceso de corrosión que se puede desarrollar sobre un material determinado, para el caso de estudio el acero inoxidable Cold Rolled, el uso de estas técnicas representan un mecanismo de medición y cuantificación de la corrosión que puede sufrir los materiales usados en la industria frente a los distintos medios y agentes corrosivos; lo podemos ver evidenciado a través del desarrollo de la formación de la capa corrosiva sobre el material de estudio, el cual ha sufrido una transformación de su estructura externa producto del periodo de exposición y que empleando al ser humano como mecanismo de medición no se obtendrían resultados significativos; es por esto que el uso de técnicas instrumentales permiten no solo una identificación del estado en que se encuentran los materiales, sino también, la cuantificación de variables que permiten tomar decisiones frente al estado en que se encuentran los materiales corroídos debido a su uso constante.

4. CONCLUSIONES

Después de realizar el proceso de obtención de material, recortarlo, aplicar el recubrimiento metálico, preparar los agentes corrosivos y las celdas donde se exponen las probetas, se realizaron las pruebas con las técnicas electroquímicas, se obtuvieron datos, se hizo un análisis de datos y con el análisis grafico se llega a las siguientes conclusiones:

- Se concluye que la salmuera es un agente corrosivo muy agresivo ya que ataca con mucha rapidez las probetas, acorde a los resultados mostrados en las tablas 7 y 8, en las cuales se pueden evidenciar que los resultados de la técnica resistencia a la polarización lineal evidencian un mayor resultado durante 48 horas y esta dado por que en la prueba Pull Off de adherencia la probeta de 48 horas tenia menor adherencia que la probeta de 96 horas, también puede haber sido una capa de corrosión que se generó sobre la placa o por la aplicación de el recubrimiento en esta placa.
- Se determinó el valor de resistencia a la corrosión y la velocidad de corrosión, por medio de técnica electroquímicas de corriente directa del recubrimiento ARC 855.
- Se determinó la velocidad de corrosión del recubrimiento ARC 855 por medio de las curvas de polarización o curvas de Tafel al ser expuesto a un ataque corrosivo en salmuera al 3,5% en peso. Durante 0, 24, 48, 72 y 96 horas.
- Se evaluó la adherencia del recubrimiento ARC 855 por medio de la técnica Pull Off.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] McCafferty, E. (2010). *Introduction to corrosion science*. New York: Springer.
- [2] J. A. Salazar-jiménez, “Introducción al fenómeno de corrosión: tipos , factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica).,” *Tecnol. en Marcha*, vol. 28, no. 506, pp. 127–136, 2015.
- [3] Roussak, O. and Gesser, H. (2013). *Applied chemistry*. New York: Springer.
- [4] E. F. Navarrete Cueva and O. C. Salgado Rodas, “Determinación de la corrosividad atmosférica de las ciudades de Santo Domingo y Esmeraldas,” Escuela Politécnica Nacional, 2007.
- [5] E. V. López, “Uso De Métodos Electroquímicos Como De Interfase En Sistemas Heterogéneos Metal / Medio Acuoso,” *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, vol. 34, pp. 241–251, 2010.
- [6] E. A. L. Covalada, “Resistencia a la corrosión y al desgaste de recubrimientos de 140 MXC-530AS y 140MXC-560AS sobre acero AISI-SAE 4340 usando la técnica de proyección térmica por arco.,” Universidad Nacional de Colombia Facultad, 2012.
- [7] A. P. Jaramillo and A. F. S. Marín, “Evaluación electroquímica de los recubrimientos cadmio, cromo y níquel para la protección contra la corrosión de componentes aeronáuticos.,” UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2018
- [8] PEDEFERRI, P. (2019). *CORROSION SCIENCE AND ENGINEERING*. [S.I.]: SPRINGER.

- [9] J. L. TRISTANCHO REYES, "Caracterización por sales fundidas de los recubrimientos metálicos NiCrFeNbMoTiAl, NiCrAlY, mediante técnicas electroquímicas.," Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C., 2011.
- [10] Milella, P. (2013). *Fatigue and corrosion in metals*. Milan: Springer.
- [11] PEREZ, N. (2018). *ELECTROCHEMISTRY AND CORROSION SCIENCE*. [Place of publication not identified]: SPRINGER
- [12] Ohtsuka, T., Nishikata, A., Sakairi, M. and Fushimi, K. (2018). *Electrochemistry for Corrosion Fundamentals*. Singapore: Springer Singapore.
- [13] A. Salazar-jiménez, "Introducción al fenómeno de corrosión: tipos , factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica).," *Tecnol. en Marcha*, vol. 28, no. 506, pp. 127–136, 2015.